

Mendeléiev: la revolució química rusa

Antoni Salvà

Salvà, A. (2016). Mendeléiev: la revolució química russa. *In*: Ginard, A.; Vicens, D. i Pons, G.X. (eds.). Idees que van canviar el món. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 22; 211-232. SHNB - UIB. ISBN 978-84-608-9162-8.

Disponible on-line a shnb.org/SHN_monografies

Resum: Dmitri I. Mendeléiev (1834-1907) fou un químic rus que descobrí el 1869 la llei periòdica, això és, una regularitat en les propietats dels elements químics que es repetien cada un cert nombre d'elements quals se'ls ordenava per ordre creixent de la seva massa atòmica. En base a aquesta periodicitat els ordenà en una taula, la taula periòdica, que ha esdevingut una icona pels químics. La llei periòdica permeté a Mendeléiev predir quants d'elements químics encara no s'havien descobert, assenyalar-ne les seves propietats i les dels seus composts, i detectar errors en valències i masses atòmiques dels coneguts. Fou també el primer que descobrí la temperatura crítica, el primer en formular la famosa equació d'estat dels gasos ideals i el primer en calcular el valor de la constant dels gasos R. Malgrat la gran importància dels seus descobriments no fou guardonat amb el Premi Nobel de Química. Les seves idees polítiques l'enfrontaren al règim tsarista, malgrat l'assessorà en moltes ocasions en qüestions tècniques, i dimití de la seva càtedra a la universitat als 56 anys. Per evitar un escàndol major, el govern li donà un càrrec a l'Oficina de Peses i Mesures, que modernitzà i preparà per a la introducció del sistema mètric.

Dmitri Ivànovitx Mendeléiev és un químic conegut com l'artífex de la taula periòdica i com el químic que fou capaç de predir l'existència de nous elements químics, les seves propietats i el nombre aproximat d'elements que

hi havia a la naturalesa. El seu origen rus i les seves obres escrites en rus impediren durant bona part del segle XX conèixer la seva biografia i d'altres contribucions científiques importants. Al mateix temps sorgiren un cert nombre d'anècdotes, que resten sense documentar, com ara el fet que descobrí l'ordenació dels elements químics en un somni, que els descobrí



Figura 1. Retrat de Mendeléeiev realitzat per la seva esposa Anna I. Popova, l'any 1885 (Wikimedia Commons).

jugant a cartes o que els seus estudis sobre les dissolucions d'etanol en aigua siguin la base del secret del vodka rus. La poca informació que arribava als estudiants de química, comparada amb la d'altres científics, la fotografia amb unes llargues i blanques cabellera i barba que ha esdevingut una representació del típic científic (Fig. 1), induïa a pensar que es tractava d'un químic que treballava solitari en la llunyana Sibèria, on naixé. Tot al contrari, Mendeléeiev fou un gran viatger durant tota la seva vida, estava en contacte amb els químics més destacats d'Europa i els visitava regularment. Viatjà també als Estats Units on prengué contacte amb les noves tecnologies d'explotació petrolífera. D'Europa importà també tecnologia cap a una Rússia que havia

quedat endarrerida respecte del món occidental i contribuï a la seva modernització. Tingué molts d'enemics, dins la mateixa Rússia en el govern per les seves idees lliberals i reformadores, i en el món acadèmic per la seva germanofília i prestigi internacional; i entre la comunitat científica estrangera també tingué importants enemics que, per exemple, li impediren ser guardonat amb el Premi Nobel de Química. Tanmateix rebé el reconeixement de la majoria de químics i de les més prestigioses universitats i societats científiques de principis del segle XX.

BIOGRAFIA

Infantesa a Tobolsk

Dmitri Ivanovitx Mendeléeiev naixé el 8 de febrer de 1834 (27 de gener segons el calendari julià vigent a Rússia en aquell moment), en la ciutat

siberiana de Tobolsk. El seu pare, Ivan Pávlovich Mendeléiev de 51 anys, que havia estudiat pedagogia a Sant Petersburg, fou destinat com a professor de rus a l'Institut de Tobolsk, on conegué Maria Dimitrievna Korniliev, 10 anys més jove que ell, amb la qual es casà el 1809. Tingueren 17 fills, dels quals en el moment del naixement de Dmitri, el més petit, només en vivien 14. La família es desplaçà a Tambov i a Saratov seguint les destinacions dels pare. Finalment retornaren a Tobolsk durant els anys 20 quan el pare hi fou destinat com a director de l'institut de secundària (Babaev, 2009). Des del 1825 governava Rússia el tsar Nicolau I (1796-1855) que transformà el règim aristocràtic en un despotisme burocràtic al servei de l'estat, la qual cosa congelà Rússia durant el seu regnat (1825-1855) (Román, 2008).

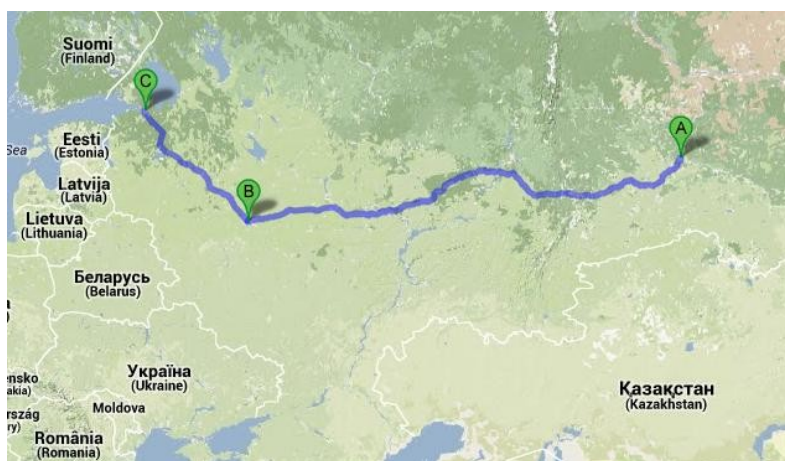


Figura 2. Ruta seguida per Mendeléiev, la seva mare i la seva germana des de Tobolsk (A), fins a Moscou (B) i Sant Petersburg (C) el 1849 (Google Maps).

L'any del naixement de Dimitri, el seu pare quedà cec per cataractes i hagué de retirar-se. Com que la pensió era insuficient la seva esposa anà a dirigir la fàbrica de vidre de la seva família a Aremzianskoie, situada a 32 km de Tobolsk. Maria descendia d'una família acomodada que s'havia instal·lat a Tobolsk a principis del segle XVIII i havia introduït a Sibèria les primeres manufactures de paper i vidre. L'avi de Dimitri fundà el 1787 el primer diari de Sibèria, el *Irtysch*. Dmitri començà a estudiar al seu poble als 7 anys. Era bon estudiant, destacant en matemàtiques, física, història i geografia. Però tenia dificultats en llatí, grec i teologia. En aquests anys Mendeléiev passava moltes hores a la fàbrica de vidre, on conegué al químic Timofei que li ensenyà tots els secrets de la manufactura del vidre i li inculcà la idea de que «*Tot en el món és art*». També rebé la influència del seu cunyat Bessargin, espòs de la seva germana major Olga, que amb els seus amics acudia

assíduament a visitar els Mendeléiev car tenien una casa confortable amb una rica biblioteca. Bessargin havia estat desterrat a Sibèria per pertànyer al grup dels Desembristes, que havien descobert les idees il·lustrades d'Europa Occidental en la guerra contra Napoleó, i el 26 de desembre de 1825 protagonitzaren una insurrecció, que fou durament reprimida. De Bessargin i els seus amics descobrí les idees lliberals, aprengué ciències naturals i li quedà la idea que «*Tot en el món és ciència*» (Román, 2008).

El pare de Dmitri morí quan aquest tenia 13 anys i als 15 completà els seus estudis. Com que Dmitri havia començat els seus estudis un any abans de l'edat obligatòria, per evitar els problemes administratius els seus mestres posaren que tenia 16 anys en el seu certificat el 12 juliol 1849 (Babaev, 2009). L'estiu del 1849, Maria i els seus dos fills petits, Dmitri i Elisabeth, emprengueren camí cap a Moscou per a matricular Dmitri a la seva universitat, a uns 2000 km de Tobolsk, en carros de cavalls, car el tren encara no s'havia estès per Rússia (Fig. 2). Maria havia estalviat doblers i decidí invertir-los en l'educació de Mendeléiev enlloc de destinar-los a la reconstrucció de la fàbrica de vidre que quedà destruïda per un incendi el 1848. També comptava amb el suport econòmic del seu germà Vasili Korniliev, que gaudia d'una excel·lent posició i tenia amics influents (Román, 2008).

Els anys d'estudiant a Sant Petersburg

A Moscou, Mendeléiev no fou admès a la universitat car provenia del districte universitari de Kazan. En la primavera de 1850 Maria i els seus dos fills petits es dirigiren cap a Sant Petersburg, a 650 km. Allà trobaren un clima d'agitació política i el mateix problema per ingressar a la universitat. Però gràcies a Plenov, director de l'Institut Pedagògic de Sant Petersburg, i amic del pare de Mendeléiev, pogué realitzar els exàmens en aquest centre, que preparava als alumnes per a impartir classes als instituts de secundària (Román, 2008). Els superà de forma discreta (un 3,22 sobre 5) i fou admès en el programa del departament de ciències físico-matemàtiques amb una beca que l'obligava a impartir dos anys de classe a un institut per cada any de formació. Ingressà el mateix any, el 9 d'agost (Babaev, 2009).

El 20 de setembre morí la seva mare de tuberculosi i esgotament físic, el seu oncle Vasili el 1851, i el 1852 la seva germana per les mateixes causes que la mare. Dmitri també hagué de ser hospitalitzat i els metges li diagnosticaren tuberculosi amb poques esperances de vida (Babaev, 2009).

L'horari de treball a l'Institut Pedagògic era molt dur (Román, 2008):

Hora	6.30 8.00	8.30 9.00	9.00 15.00	15.00 16.00	16.30 18.00	19.00 20.30	20.30 21.30	21.30 22.30
Activitat	Estudi	Desdejuni	Estudi	Dinar	Classes (1r cicle) Descans (2n cicle)	Estudi	Sopar	Estudi

Mendeléiev fou admès amb un any d'endarreriment respecte dels alumnes de 1r cicle, la qual cosa l'obligà a repetir curs. Els primers anys destacà poc, el 1851 quedà el 25è de 28 alumnes, però el 1854 ja quedà el 7è (Babaev, 2009). Els seus professors més destacats foren M.V. Ostrogradski¹ en matemàtiques, A.N. Savich² en astronomia, H. Lenz³ i A.T. Kupffer⁴ en física, J.F. Brandt⁵ en zoologia i Alexander Voskressenski⁶ (1809–1880) en química. Voskressenski fou el qui impactà més Mendeléiev, ja que estimulava en els seus alumnes a que pensassin amb audàcia i a vèncer tots els obstacles que poguessin trobar en el seu camí (Pisarzhevski, 1955). Havia estat deixeble de J. von Liebig (1803-1873) i seguia les idees de J.J. Berzelius (1779-1849). Malgrat això, feia confrontar aquestes idees amb les innovadores de J.B. Dumas (1800-1884), A. Laurent (1805-1853) i C.F. Gerhardt (1816-1856) (Román, 2008) (Viquipèdia, 2014).

El 1854, essent encara d'estudiant, aconseguí publicar dos treballs en alemany a la revista de la Societat Imperial de Mineralogia de Rússia, que duïen per títol *Anàlisi químic de les ortites de Finlàndia i Els piroxens de Ruskiala en Finlàndia*. El 1855, l'any de la coronació del tsar Alexandre II⁷, es graduà, essent guardonat amb una medalla d'or per haver obtingut les millors qualificacions del seu curs. Presentà una tesi de fi de carrera titulada *L'isomorfisme en relació amb els altres punts de contacte amb les formes cristal·lines i la composició*⁸ (Román, 2008).

1 Mikhail Vasil'jevič Ostrogradskij (1801-1862). Matemàtic ucraïnès. En física matemàtica contribuï a resoldre problemes de la mecànica newtoniana (principi d'Ostrogradskij-Hamilton), estudià les deformacions dels cossos elàstics, el desplaçament d'un mòbil dins un medi resistent, etc. Establí una fórmula general que porta el seu nom i permet passar d'una integral de volum a una integral de superfície (teorema de Gauss) (GEC, 2014).

2 Aleksei Nikolaevich Savich (1811-1883). Astrònom rus. Determinà òrbites de cometes, planetes i satèl·lits, estudis de refracció i anivellament baromètric. Amb P.M. Smyslov i R.E. Lents foren els primers a Rússia en determinar la força de la gravetat usant pèndols reversibles al llarg d'un arc de meridià (1865-1868) (TGSE, 1970-79).

3 Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865). Físic rus d'origen alemany. El seus estudis més destacats són sobre inducció magnètica. A ell se li deu la llei de Lenz i en el seu honor el símbol de la inductància és una L (Viquipèdia, 2014).

4 Adolph Theodor Kupffer (1799-1865). Químic i físic rus d'origen alemany. Fundà el Departament de Peses i Mesures i l'Observatori de Rússia (Wikipedia, 2014).

5 Johann Friedrich von Brandt (1802-1879). Naturalista alemany. Fou director del Departament de Zoologia de l'Acadèmia de les Ciències de Sant Petersburg. S'especialitzà en els coleòpters. El ratpenat de Brandt i l'eriçó de Brandt són anomenats en honor seu (Viquipèdia, 2014).

6 Alexander Abramowitsch Voskressenski (1809-1880). Químic rus, considerat l'avi de la química russa car fou professor d'una important generació de químics russos. Aïllà per primer cop el 1841 l'alcaloide teobromina del cacau (Wikipedia, 2014).

7 Alexandre II de Rússia (1818-1881). Tsar de l'Imperi rus (1855 - 1881). Passà a la història com el més important reformador de la societat russa durant el període tsarista (Viquipèdia, 2014).

8 L'isomorfisme és la propietat que tenen certes substàncies de diferent composició química de cristal·litzar sota la mateixa forma i poder substituir-se en qualsevol proporció en el mateix cristall. Fou un terme introduït el 1819 pel químic alemany Mitscherlich (Viquipèdia, 2014).

Els anys a Crimea

Després de graduar-se, la malaltia que patia s'agreujà. El seu metge, el professor Zdekauer, li donà dos anys de vida i l'aconsellà que anàs a Crimea, amb un clima més adient, i on trobaria al cirurgià Nicolàs Pirogov que el tractaria. Mendeléiev sol·licità una plaça de professor a Odessa, però fou destinat a Simferopol, on arribà el 25 d'agost de 1855, i hi trobà l'institut tancat a causa de la Guerra de Crimea quan els aliats tenien la propera ciutat portuària de Sebastopol assetjada⁹. Aconseguí ser visitat per Pirogov, que dirigia els serveis mèdics de les tropes russes, el qual li diagnosticà no una tuberculosi, sinó una petita lesió cardíaca sense importància (Román, 2008).

De Simferopol es traslladà a Odessa, dos mesos més tard, on pogué impartir classes de matemàtiques, física i ciències naturals al seu institut, l'antic Institut Richelieu dels Jesuïtes, que tenia una excel·lent biblioteca. Durant sis mesos preparà la seva tesi de professor en ciències, *Sobre els volums específics*, un important treball teòric que tingué importància en la definició de massa atòmica relativa i molècula. S'examinà el 9 de setembre de 1856 i aconseguí un excel·lent informe del tribunal de la Universitat de Sant Petersburg. Després, l'octubre del mateix 1856 presentà una nova tesi, *Sobre l'estructura de les combinacions silícies*, que li permeté ser nomenat encarregat de curs de la càtedra de química de la Universitat de Sant Petersburg. El gener de 1857 impartia classes de química orgànica però, com que els seus ingressos li eren insuficients, acceptà un lloc de professor de química en l'Institut Pedagògic i impartí, també, classes particulars (Babaev, 2009).

Ampliació d'estudis a l'estranger

La universitat li concedí a finals del 1858 una beca d'ampliació d'estudis de 22 mesos a l'estranger. Viatjà en la diligència ocupant el seient al costat del conductor, perquè era més econòmic, fins a Varsòvia i Cracòvia. Després agafà el tren per seguir el viatge (Román, 2008). Al principi, Mendeléiev realitzà un llarg viatge d'un parell de mesos per triar el lloc. A París, conegué M. Berthelot, C.A. Wurtz i J.B. Dumas, i més tard a Munic conversà amb J. von Liebig, que recordava Voskressenski. Finalment, Mendeléiev decidí quedar-se a la Universitat de Heidelberg, on treballaven G.R. Kirchhoff i R.W. Bunsen, i hi havia una nombrosa comunitat d'alumnes russos (Babaev, 2009).

Quan arribà a Heidelberg Kirchhoff i Bunsen havien començat l'anàlisi espectral dels elements químics, tema que no era de l'interès de Mendeléiev. Per això, i com el lloc al laboratori que Bunsen li assignà no fou del seu

9 La Guerra de Crimea (des del 28 de març de 1853 fins a l'1 d'abril de 1856) fou un conflicte bèl·lic que enfrontà l'imperi Rus, per una banda, amb una aliança entre el Regne Unit de Gran Bretanya i Irlanda, el segon Imperi francès, el Regne de Sardenya i una part de l'imperi Otomà, per l'altra. La major part del conflicte armat se situà a la península de Crimea a la Mar Negra (Viquipèdia, 2014).

interès per la brutor, el poc espai i la manca de bons instruments, decidí muntar el seu propi laboratori a la seva residència. Encarregà quasi tots els aparells (Fig. 3) al constructor Salleron de París, i d'altres a Bonn, i començà a estudiar la capil·laritat i la tensió superficial. Entre els aparells destaca l'anomenat picnòmetre de Mendeléiev (Román, 2008).

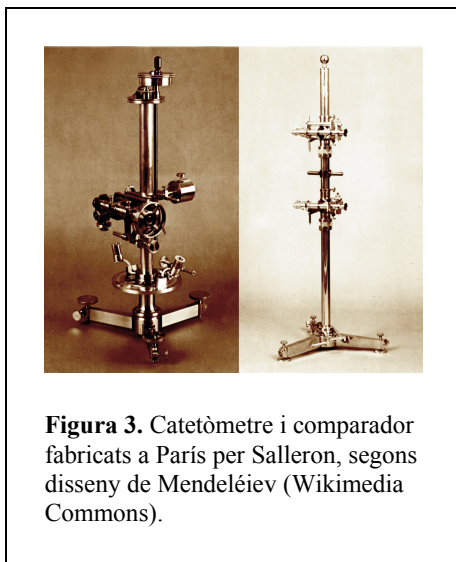


Figura 3. Catetòmetre i comparador fabricats a París per Salleron, segons disseny de Mendeléiev (Wikimedia Commons).

A Heidelberg es relacionà amb la colònia d'estudiants russos o d'investigadors que hi eren de pas. Entre ells destaquen el químic i compositor A. Borodin¹⁰, el fisiòleg I. Sechenov¹¹, el químic A. Butlerov¹² i el matemàtic Vychnegradsky. Allà llegien la poesia de Pushkin i les obres de Herzen i celebraven les victòries de Garibaldi. Mendeléiev també aprofità per viatjà a varies ciutats d'Itàlia, Suïssa i França. A París molt probablement visità els laboratoris de Regnault i Wurtz. I entre el 3 i el 6 de setembre de 1860 assistí, juntament amb Borodin i N.N. Zinin¹³ i quatre químics més, al 1r congrés

internacional de químics, a la ciutat alemanya de Karlsruhe, en representació de Rússia. En aquest congrés quedà impressionat per la claredat de l'exposició del químic italià S. Cannizzaro (1826-1910) sobre la definició de molècula del també químic italià A. Avogadro (1776-1856), sobre el concepte de massa atòmica i el mètode de determinació de Cannizzaro (Román, 2008).

Retorn a la Universitat de Sant Petersburg

El febrer de 1861 retornà a la Universitat de Sant Petersburg. Com que no hi trobà un lloc de treball estable es dedicà a escriure i editar treballs

10 Aleksandr Porfirievitx Borodín (1833-1887). Compositor i químic rus. Destacà entre els compositors del nacionalisme rus, també conegut com el Grup dels Cinc. La seva obra més destacada és l'òpera *El príncep Ígor* (Viquipèdia, 2014).

11 Ivan Mikhaylovich Sechenov (1829-1905). Fisiòleg rus. Demostrà que l'activitat cerebral està vinculada a corrents elèctriques i fou el primer a introduir l'electrofisiologia. Entre els seus descobriments destaca la inhibició cerebral dels reflexos espinals (Wikipedia, 2014).

12 Aleksandr Mikhàilovitx Bútlerov (1828-1886). Químic rus. Creadors de la teoria de la química estructural juntament amb Archibald Scott Couper i Friederich August Kekulé. (Viquipèdia, 2014).

13 Nikolay Nikolaevič Zinin (1812-1880). Químic orgànic rus. Fou professor d'Alfred Nobel i és conegut per la reducció de Zinin (Viquipèdia, 2014).

científics. En destaca un resum del Congrés de Karlsruhe, la traducció de l'alemany del llibre de Wagner *Tecnologia química*, i la redacció del seu llibre *Química orgànica*, de 481 pàgines en només tres mesos, la primera obra d'aquesta matèria a Rússia (Román, 2008). Aquesta obra fou escrita amb l'objectiu d'aconseguir la medalla Demidov i, especialment, l'important premi en metall·lic que l'acompanyava ja que Mendeléiev tenia pocs ingressos i havia acumulat molts deutes (Babaev, 2009). Efectivament l'obra fou guardonada el 1862 amb la medalla Demidov a proposta del químic Zinin, i traduïda a l'alemany per recomanació de F.K. Beilstein. El 1863 es publicà la 2a edició i darrera (Román, 2008). En aquest mateix any visità els camps de petroli de Bakú¹⁴, al Caucas¹⁵, on el milionari Kokorev volia millorar la producció de la seva refineria (Babaev, 2009).



Figura 4. Mendeléiev i la seva esposa Feozva Nikitichna Lescheva el 1862. (Wikimedia Commons)

El 22 d'abril de 1862, als 28 anys, es casà amb Feozva Nikitichna Lescheva (1828-1905), sis anys major que ell (Fig. 4). Tingueren tres fills. La primera fou Maria el 1863 que morí abans de complir un any. El segon fou Vladimir, (1865-1898), i la tercera Olga (1868-1950) (Babaev, 2009).

Entre 1864 i finals de 1866 fou professor de química a l'Institut Pedagògic. En aquells anys viatjava a l'estranger tres o quatre mesos a l'any per assistir a reunions científiques i escrivia articles sobre tecnologia química, com ara la relacionada amb la producció d'etanol. El 1865, als 31 anys, presentà la seva tesi doctoral titulada *Consideracions sobre la combinació de l'alcohol i l'aigua*. El mateix any fou nomenat professor de química tècnica de la Universitat de Sant Petersburg i el 1867 ocupà la càtedra de química mineral, que ell reanomenà de química general, succeint a Voskresenski (Román, 2008).

El 1865 comprà, juntament amb antics companys d'estudis, una finca de 60 ha a Boblovo, a 320 km de Sant Petersburg, a prop de Moscou, gràcies a l'alliberació dels serfs el 1861 que provocà la ruïna de molt terratinents i l'abandonament de terres que abaixaren de valor. Mendeléiev dugué a terme

¹⁴ Bakú és la capital i la ciutat més gran de l'Azerbaidjan. Està situada a la costa sud de la península d'Apseron (o Abşeron), a la riba del mar Caspi (Viquipèdia, 2014).

¹⁵ El Caucas és una regió natural a l'est d'Europa i a l'oest d'Àsia, entre el mar Negre i el mar Caspi (Viquipèdia, 2014).

un projecte innovador quant al cultiu, introduint mètodes científics, i quant a les condicions laborals dels seus treballadors, molt més humanitzades que les dels antics terratinents. Aquest projecte assolí en poc temps els seus objectius i fou exemple d'exploració productiva. Així, abans es produïa una mitjana de 10 quintars/ha de cereals i Mendeléiev aconseguí arribar a quasi 23 quintars/ha duplicant, per tant, la producció. El 1867 en aquesta finca una neboda seva el descriu, quan tenia 33 anys, així: *«Un home alt, aclurit, un poc inclinat..., amb una barba rossa i llargs cabells surant per damunt d'un gran front... Vestia amb una llarga brusa gris, sense cinturó, cobert amb un capell de palla blanc, ràpid de moviments..., apassionat per tot, sempre de bon humor»* (Román, 2008).

El 1867 visità novament els camps de petroli de Bakú, enviat pel govern rus com assessor científic. També viatjà a París per organitzar el pavelló de Rússia a l'Exposició Internacional. En aquest viatge visità fàbriques franceses, belgues i alemanyes on observà els processos Leblanc i Solvay per a l'obtenció de carbonat de sodi o sosa. En arribar a Rússia aconsellà la producció de sosa aplicant aquest processos, però no es construí la primera fàbrica que emprava el procés Solvay fins el 1888 i la que emprava el procés Leblanc fins el 1890, degut a les reticències del govern a eliminar els impostos que gravaven la sal. Inicià la redacció de la seva gran obra, *Principis de Química*, que es publicà en fascicles entre 1868 i 1869, la primera part, i entre 1870 i 1871, la segona. En un fascicle del 1869 apareix la seva llei periòdica. El 1868 fou un dels fundadors de la Societat Química de Rússia que facilità la comunicació amb els científics europeus i nord-americans. En aquells anys Mendeléiev intentava passar poc temps amb la seva esposa ja que tenien interessos totalment oposats. Des del 1871 vivien pràcticament separats, un a la finca de Boblovo i l'altre a Sant Petersburg, alternat-se (Román, 2008).

El 1876 viatjà, enviat pel govern, a l'Exposició Industrial de Filadèlfia, als EUA, durant dos mesos i mig, visitant els camps de petroli de Pennsilvània on quedà impressionat pels avanços tecnològics. El mateix any Mendeléiev, que tenia 42 anys, conegué Anna Ivanova Popova (1860-1942), de 16 anys, estudiant de belles arts, amiga de la filla de la seva germana major Olga. El 1877

ja n'estava enamorat. Mendeléiev volia separar-se de la seva dona, però aquesta no li acceptava el divorci. Foren uns temps que Mendeléiev passà de



Figura 5. Mendeléiev el 1878. Oli d'Ivan N. Kramskoi (1837-1887) (Wikimedia Commons).

forma turmentada (Fig. 5). Caigué malalt i hagué de passar un hivern a Biàrritz (Román, 2008).

El 1880 visità novament els camps petrolífers del Caucas on s'havien aplicat les mesures per ell proposades (eliminació d'imposts indirectes, ús de cisternes, vaixells cisterna i petits oleoductes), la qual cosa permeté passar de 40 pous explotats el 1876 a 350 el 1880 (Román, 2008). En aquest any fou rebutjat el seu ingrés a l'Acadèmia Russa de Ciències per part d'acadèmics tsaristes, la qual cosa provocà una indignació arreu de les més prestigioses universitats russes (Pisarzhevski, 1955). El mateix any, Anna partí cap a Roma per intentar tallar la relació (Román, 2008).

El 1881 Mendeléiev organitzà un viatge a Alger, per assistir a un congrés científic, però amb l'objectiu de suïcidar-se lluny de Rússia tirant-se per la borda del vaixell. Per sort confià el seu testament al seu amic Beketov i unes cartes que no havia enviat a Anna. En veure'l en aquell estat, Beketov visità Feozva a Boblovo i aconseguí que acceptàs el divorci. Per sort pogué donar la notícia a Mendeléiev abans que embarcàs cap a Alger, el qual decidí dirigir-se a Roma per trobar-se amb Anna. Ella acceptà casar-se i ell l'acompanyà en el viatge de fi de carrera passant per Nàpols, Capri, París, Sevilla, Madrid, Toledo i Biàrritz (Román, 2008).

A principis del 1882, als 48 anys, es divorcià de Feozva i el 22 d'abril es casà amb Anna, de 22. Tingueren quatre fills: un fill anomenat Lyubov (1882-1939), un Ivan (1883-1936) i bessons, un nin i una nina, Vasili (1886-1922) i Maria (1886-1952) (Babaev, 2009).

El 1887 la Societat Tècnica Russa proposà a Mendeléiev l'observació de l'eclipse total de Sol el 19 d'agost a Klin enlairant-se en un globus. Havia de controlar l'aparell, l'aeronauta Kovanko, però es comprovà que el globus no podia enlairar-se amb dues persones i Mendeléiev s'enlairà sol. Quan intentava completar les observacions perdé el control del globus però aconseguí aterrar. El 1888 fou encarregat pel govern d'estudiar la producció de carbó a la conca hullera del Donbass¹⁶, ja que s'importava carbó d'Anglaterra (Román, 2008).

El 1890 dimití de la seva càtedra a la Universitat de Sant Petersburg en suport a les peticions dels estudiants desateses pel ministre d'Instrucció Pública Deliánov (Pisarzhevski, 1955). Tanmateix quedà poc temps sense feina car el govern li encarregà la preparació de pólvora sense fum pels canons de gran calibre de l'armada. Viatjà a Anglaterra i França per conèixer les tècniques emprades. Amb sis col·laboradors aconseguí fabricar un nou tipus de pólvora, de millor qualitat que les existents, que anomenà pólvora sense fum al pirocoloidó¹⁷ (Román, 2008).

El 1891 publicà *Tarifa raonada o estudi del desenvolupament de la indústria russa amb la tarifa duanera de 1891*, en la qual considerava que el

16 La conca del Donbass és una conca hullera, situada entre el mar d'Azov i el riu Don, compartida actualment per Ucraïna i Rússia (Viquipèdia, 2014).

17 El pirocoloidó és una varietat de nitrocel·lulosa, amb una proporció de nitrogen entre el 12,45 i el 12,75 %, completament soluble en una mescla d'etanol i èter.

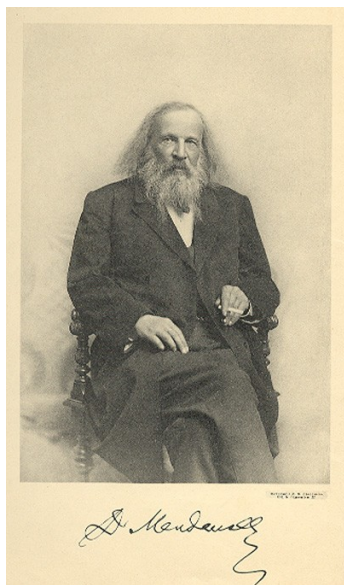


Figura 6. Mendeléiev entre 1890-1907 i signatura. Fotografia del Brockhaus and Efron Encyclopedic Dictionary (Wikimedia Commons).

desenvolupament industrial de Rússia havia d'estar lligat al desenvolupament científic, a l'exportació de productes industrials enlloc de matèries primes, i a l'ús de més mà d'obra (Román, 2008).

El 1892 l'anomenaren conservador científic de la Oficina de Peses i Mesures, amb la idea que pogués descansar i compensar-lo per la dimissió de la seva càtedra (Fig. 6). Però Mendeléiev enlloc de relaxar-se reorganitzà el vell organisme i es convertí en el seu director, posant en marxa un intens programa de recerca, i preparant-lo per l'adopció del sistema mètric decimal, si bé no s'introduí fins el 1918 (Román, 2008).

En aquests anys viatjà a Dresde i a Londres el 1894, on rebé els doctorats honoris causa de les universitats de Cambridge i Oxford; París, Londres, Berlín i Viena el 1895; i París i Suïssa el 1897 (Fig. 7) (Román, 2008).

Des del 1904 fou nominat a Premi Nobel de Química, però la seva candidatura fou rebutjada any rere any, el 1906 per un sol vot, per pressions d'Svante A. Arrhenius (1859-1927), que era contrari a la teoria de les dissolucions de Mendeléiev. El 2 de febrer de 1907 morí de grip a Sant Petersburg, sis dies abans de complir els 73 anys (Román, 2008).

RECERCA

Els camps de recerca de Mendeléiev al llarg de la seva vida foren molt amplis. En el camp de la ciència realitzà treballs sobre: llei periòdica, química inorgànica, fisicoquímica de les dissolucions, teoria dels gasos, física dels líquids (hidrodinàmica i aerodinàmica), tecnologia, agroquímica i agricultura, olis, química orgànica, mineralogia, isomorfisme i pólvora. En altres camps realitzà estudis sobre pedagogia, metrologia, economia i filosofia (Babaev, 2009).

Físicoquímica de les dissolucions i dels gasos

En les investigacions que realitzà al seu laboratori a Heidelberg descobrí la temperatura absoluta d'ebullició, que més tard rebria el nom de temperatura crítica, i que no depenia de la pressió. Amb això explicà el problema que hi havia amb certs gasos (hidrogen, nitrogen, oxigen, metà, monòxid de carboni, etc.) que no podien liquar-se malgrat se'ls sotmetés a molt elevades pressions. Mendeléiev indicà que aquests experiments es realitzaven per sobre de les temperatures absolutes d'ebullició i per liquar el gas calia, a més d'augmentar la pressió disminuir, també, la temperatura. Publicà, el 1861, un article al respecte en alemany (Mendeléiev, 1861) i en francès titulat *Sobre la cohesió d'alguns líquids i sobre el paper de la cohesió molecular en les reaccions químiques dels cossos* (Román, 2008). La temperatura absoluta d'ebullició s'anomena actualment temperatura crítica, que fou el nom que li posà Thomas Andrews (1813-1885) i que el mateix Mendeléiev observà que ell ja ho havia descobert (Mendeléiev, 1870).

A la seva tesi doctoral, titulada *Consideracions sobre la combinació de l'alcohol i l'aigua*, defensà que a les dissolucions d'etanol i aigua és formen nous composts químics, com ara, els composts etanol:aigua en les proporcions 1:3, 3:1, i fins i tot 1:12. Això indica que, en aquest cas, no es tracta d'un procés físic, sinó d'una vertadera reacció química (Babaev, 2009).

El 1872 en els seus estudis teòrics estudià la desviació de la llei de Boyle-Mariotte per a gasos reals a baixes pressions. El 1874 generalitzà l'equació de Clapeyron dels gasos ideals obtinguda el 1834 pel físic francès B. P. E. Clapeyron (1799-1864). Clapeyron relacionà la pressió p , el volum V i la temperatura t , en graus centígrads, d'un gas a partir de les lleis de Boyle-Mariotte i de Charles i Gay-Lussac en l'equació:

$$p \cdot V = R_C \cdot (267 + t)$$

on apareix la constant de proporcionalitat R_C que depèn de la massa del gas i del tipus de gas.

El 1850 el físic alemany Rudolf Clausius (1822-1888), emprant les dades experimentals del físic francès Henri Victor Regnault (1810-1878) reavaluà la constant de valor 267 i donà el valor 273. El 1864 substituï el parèntesi per la temperatura absoluta T (Jensen, 2003):

$$p \cdot V = R_C \cdot (273 + t) \rightarrow p \cdot V = R_C \cdot T$$

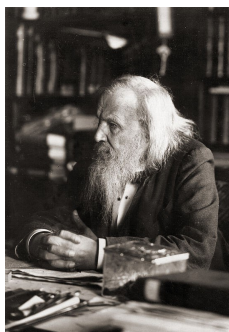


Figura 7. Mendeléiev el 1897 al seu despatx. (Wikimedia Commons).

El 1873 el químic alemany August F. Horstmann (1842-1929) escriví per primer cop l'equació d'estat dels gasos per a un mol de substància ($u = V/n$) sense adonar-se'n que la nova constant era ara independent del tipus de gas (Jensen, 2003):

$$u \cdot p = R \cdot T$$

Mendeléiev el 1874 (Mendeléiev, 1874) aconseguí una equació més general independent del tipus de gas, vàlida per a qualsevol massa de gas, que amb notació moderna és:

$$M \cdot p \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

on m és la massa del gas, M la massa molar. Aquesta equació és coneguda com equació de Clapeyron-Mendeléiev en els països de l'est d'Europa. Amb la definició de mol $n=m/M$, adoptà la forma actual:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

El valor de R el determinà amb varis gasos i observà que les diferències eren inferiors al 0,5 %. El 1876 publicà aquesta equació en una memòria de l'*Académie des Sciences* de París i el 1877 a la revista britànica *Nature* (Mendeléiev, 1877), on indicà ja que R era una constant universal, ara coneguda com a constant universal dels gasos, i li donà a partir de les seves experiències el valor $R = 8,29482 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$, només un 0,24 % inferior al valor acceptat en l'actualitat $R = 8,31441 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ (Mychko, s.d.).

El 1884 reinicià els estudis de les dissolucions. El seu objectiu era descobrir el fenomen pel qual es produeix de l'atracció entre molècules d'un mateix compost i entre molècules de diferents composts, les forces intermoleculars.

El 1887 publicà *Estudi de les dissolucions aquoses segons el pes específic*, on proposà la teoria hidratada de les dissolucions. Establí que les dissolucions no són simples mescles sinó que contenen associacions de molècules hidratades en un estat d'equilibri dinàmic, que es dissocien de diferents maneres en funció del percentatge de concentració. Demostrà la formació de composts com $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 150\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, etc. La seva teoria trobà alguns seguidors, però el químic suec Svante A. Arrhenius i la seva escola, els desenvolupadors de la teoria física de les solucions, la criticaren. Dècades més tard ambdues teories es consideraren com a complementàries (Román, 2008).

La llei periòdica

El 1867 inicià la seva obra *Principis de Química*, on descriu els elements H, O, N, C, halògens, alcalins i alcalinoteris, i les seves

combinacions. Però a l'hora de seguir amb la resta d'elements químics no sabia com ordenar-los. Per evitar qualsevol ordre arbitrari, observà els patrons en les propietats de les famílies d'elements lleugers, organitzant-los per ordre de masses atòmiques i descobrí una espècie de períodes, que anomenà llei periòdica. Cada un cert nombre d'elements, variable, es repeten les propietats dels elements que anaven a continuació, amb variacions semblants per a tots els elements (Babaev, 2009). Els 8 punts que apareixen al seu primer treball del 1869 (Fig. 8) (Mendeléiev, 1869) són:

1. Ordenà els elements per masses atòmiques creixents, iniciant noves columnes per fer coincidir elements amb propietats físiques i químiques semblants a les línies (halògens, alcalins,...). Les columnes, per tant, no tenien el mateix nombre d'elements.

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СОСТАВѢ.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
			Mn = 55	Rh = 104.4	Pt = 197.1.
			Fe = 56	Ru = 104.4	Ir = 198.
			Ni = 59	Pd = 106.6	Os = 199.
			Cu = 63.4	Ag = 108	Hg = 200.
H = 1			Zn = 65.2	Cd = 112	
	Be = 9.1	Mg = 24		Sn = 116	As = 197?
	B = 11	Al = 27.1	? = 68	U = 118	
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79.4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35.5	Br = 80	I = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85.4	Cs = 133	Tl = 204.
		Ca = 40	Sr = 87.6	Ba = 137	Pb = 207.
		? = 45	Ce = 92		
		? Er = 56	La = 94		
		? Yt = 60	Di = 95		
		? In = 75.6	Th = 118?		

Д. Менделѣевъ

Figura 8. Primera taula periòdica publicada en rus per Mendeléiev, el 1869 (Wikimedia Commons)

2. Observà que els elements de propietats semblants tenien masses atòmiques semblants. Així descobrí tres grups de tres elements cadascun amb propietats semblants i masses atòmiques iguals o molt semblants: Fe (56)¹⁸, Co i Ni (59); Rh i Ru (104,4) i Pl¹⁹ (106,6); Pt (197,4), Ir (198) i Os (199). També observà que hi havia d'altres

18 Les masses atòmiques que figuren aquí són els valors que es coneixien en el moment de redactar els Principis de Química, el 1869.

19 El símbol del pal·ladi el 1869 era Pl, actualment és Pd.

grups d'elements de propietats semblants que les seves masses atòmiques augmentaven amb en regularitat. Per exemple, en els següents tres grups d'elements s'observa que la massa atòmica dels elements més pesats són unes 46 unitats majors que els immediatament inferiors:

K (39)	Rb (85,4 = 39 + 46,4)	Cs (133 = 85,4 + 47,6)
S (32)	Se (79,4 = 32 + 47,4)	Te (128 = 79,4 + 48,6)
P (31)	As (75 = 31 + 44)	Sb (122 = 75 + 47)

3. Observà que els elements queden ordenats segons la seva valència superior i elements d'una mateixa fila tenen la mateixa valència. Per exemple, els elements consecutius en massa atòmica següents també tenen les valències més altes que creixen amb una unitat: Li (I), Be (II), Al (III), Si (IV), P (V), S (VI), Cl (VII); o les més baixes que augmenten fins el Si per després disminuir d'unitat en unitat: Na (I), Mg (II), Al (III), Si (IV), P (III), S (II), Cl (I).
4. Se n'adonà que els elements més abundants a la naturalesa resulta que són els que tenen masses atòmiques més baixes (Mendeléiev, 1869). Així en el cos humà els sis elements més abundants són: O (61 %), C (23 %), H (10 %), N (2,6 %), Ca (1,4 %) i P (1,1 %); als oceans: O (86 %), H (11 %), Cl (1,9 %), Na (1,1 %), Mg (0,13 %) i S (0,09 %); a l'escorça terrestre: O (46 %), Si (27 %), Al (8,0 %), Fe (6,0 %), Ca (5,0 %) i Na (2,5 %) (Viquipèdia, 2014).
5. Indicà que les propietats dels elements vénen determinades per la magnitud de la massa atòmica. Encara que el comportament químic dels elements semblants és similar, no és idèntica: hi ha diferències a causa de la diferència en la massa atòmica. Per exemple, clor i iode formen compostos amb un àtom d'hidrogen: HCl i HI. Aquests són similars, per exemple tots dos són gasos corrosius i es dissolen fàcilment en aigua. Però es diferencien en que el HI té, per exemple, un punts d'ebullició i de fusió més alts que HCl (típic dels compostos semblants amb més massa atòmica).
6. Observà que per a que tots els elements quedassin ordenats calia deixar alguns buits, que suposà eren llocs corresponents a elements químics encara no descoberts i als quals els assignà una massa atòmica i en predigué les seves masses atòmiques. Els elements predits eren: eka-alumini (68), eka-silici (70), eka-bor (45) i 180.
7. Descobrí que hi havia masses atòmiques errades degut a valències errades. Per exemple la massa atòmica del Be no podia ser 13,7, com es pensava, perquè hauria de ser un element semblant al N i al P. Com que s'assembla més al Mg la seva massa atòmica ha de ser 9,4 degut a que el seu òxid serà BeO i no Be₂O₃ com se suposava. Un altre exemple és la massa atòmica del Te ha de valer entre 123-126, i no 128, perquè les propietats indiquen que la seva massa atòmica ha de

ser menor que la massa atòmica del I^{20} . En aquest cas no és un error perquè, com es demostrà posteriorment, l'ordenació no ha de ser en ordre creixent de masses atòmiques sinó de nombre atòmic, descobert el 1913 per Henry G. J. Moseley (1887-1915).

8. Amb l'ordenació dels elements químics indicà que es poden deduir semblances entre elements que no s'havien descobert experimentalment. Com exemple posà el cas de l'Ur²¹ que havia de tenir semblances amb el B i l'Al. Tanmateix l'U estava mal situat degut a que la seva massa atòmica estava mal calculada (Giunta, s.d.).

Reihen	Gruppe I. — R'O	Gruppe II. — R'O	Gruppe III. — R'O ³	Gruppe IV. RH ⁴ R'O ⁴	Gruppe V. RH ⁵ R'O ⁵	Gruppe VI. RH ⁶ R'O ⁶	Gruppe VII. RH ⁷ R'O ⁷	Gruppe VIII. — R'O ⁸
1	II=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	So=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Su=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	—
9	(—)	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	—
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	—

Figura 9. Versió del 1871 de la taula periòdica on els grups o famílies estan disposats en columnes com a les taules periòdiques actuals. (Wikimedia Commons)

La taula periòdica del 1871

El 1871 publicà un article en rus amb una nova taula, article que traduí a l'alemany i publicà l'any següent (Fig. 9). En aquesta nova taula posà els períodes en files i els grups en columnes que anomenà amb nombres romans de l'I al VIII. Els grups vénen encapçalats per la fórmula de l'òxid de major valència; i també pels hidrurs a partir del grup IV. Divideix cada període (fila) en dos i queden dintre del mateix grup elements que actualment estan separats però que fins fa pocs anys encara figuraven a la taula periòdica amb el mateix

20 A la taula de Mendeléiev figura com a símbol del iode J. Això és degut a que a les publicacions en alemany s'emprava el símbol J enlloc de I, perquè en alemany iode és *jod*. (Babaev, 2009).

21 Ur és el símbol de l'urani, actualment U.

nom de grup. Per exemple, al grup I hi havia dos subgrups: Li, K, Rb i Cs per una part i H, Na, Cu, Ag i Au per una altra. Passava igual amb tots els grups excepte el VIII (Mendeléiev, 1872).

Corregí moltes masses atòmiques que estaven mal calculades perquè els elements tenien assignades valències incorrectes. Així l'In se suposava divalent, això és amb valència II, i amb massa atòmica 75,5. Però no hi havia lloc per posar-lo entre l'As i el Se; i és un metall. Mendeléiev pensà que seria trivalent, amb la qual cosa la massa atòmica seria 113 (valor actual 115), i quedaria en la columna de l'Al i de l'eka-alumini. Un altre cas era el de l'U que se sembla al Cr, Mo i W, per això no podia ser divalent sinó que havia de ser tetravalent i li corresponia una massa atòmica de 240 (el valor actual és 238). Altres masses atòmiques que corregí seguint aquests raonaments foren (Giunta, s.d.):

Er 56	→	178 (incorrecte)
La 94	→	180 (incorrecte)
Th 118	→	231 (actual 232)
Ce 92	→	140 (actual)
Y 60	→	88 (actual 88,9)

També suposà que hi havia masses atòmiques que s'havien determinat erròniament per manca de precisió experimental, com ara, Os (199), Ir (198) Pt (197,4) i Au (197). Els ordenà de forma inversa segons les propietats de cadascun. Noves dades confirmen la seva teoria: Os (190), Ir (192), Pt (195) i Au (197) (Giunta, s.d.).

Dubtà de les posicions del Cu, Ag i Au, que els situà als grups I i VIII al mateix temps. El grup VIII estava format per subgrups de tres elements: Fe, Co i Ni; Ru, Rh i Pd; i Os, Ir i Pt (Mendeléiev, 1872).

Identificà el lantani, La, amb l'element desconegut de massa atòmica 180 (actualment el Hf), per la qual cosa el situà erròniament. Al seu lloc hi posà l'element Di (didimi) que posteriorment es descobrí que era una mescla de Pr, Nd i Sm. Tanmateix sí deixà lloc per a situar els lantànids o terres rares, que encara no s'havien descobert (Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Yb, Lu), però mal ubicats. També deixà cinc llocs pels elements transurànids no descoberts (Np, Pu, Am, Cm i Bk), amb massa atòmica superior a la de l'U, i per altres elements que es descobriren amb posterioritat: Tc, Re, Po, At, Fr, Ra, Ac i Pa, a més dels ja indicats a la taula periòdica del 1869: Sc, Ga i Ge. En total 31 llocs buits per a elements encara no descoberts el 1871 (Giunta, s.d.).

Quant als elements Sc, Ga i Ge, realitzà un estudi de les propietats dels elements que tenien al seu voltant i pogué deduir-ne les seves propietats, que resultaren ser molt bones com es veurà més endavant.

Descobriment dels elements predits

El 30 d'agost del 1875, el químic francès Paul Émile Lecoq de Boisbaudran (1838-1912) comunicà a l'*Académie des Sciences* que «*Després-ahir, divendres 27 d'agost de 1875, entre les 3 i les 4 de la matinada, he descobert els indicis d'un probable nou element, en els productes de l'anàlisi químic d'una blenda procedent de la mina de Pierrefitte, vall d'Argelès (Pirineus)*» (Lecoq de Boisbaudran, 1875). Anomenà al nou element gal·li. Una vegada estudiat s'observà que les seves propietats coincidien amb les predites per Mendelèiev per a l'element eka-alumini, excepte en la densitat. La predicció era que la densitat havia de ser $5,9 \text{ g/cm}^3$ i els resultats experimentals donaven un valor inferior, $4,3 \text{ g/cm}^3$. Ràpidament Mendelèiev envià una carta a la mateixa revista reafirmant que el valor correcte de la densitat havia d'estar entre $5,9$ i $6,0 \text{ g/cm}^3$; i suggerí que es repetís la determinació. De mala gana Lecoq de Boisbaudran la repetí amb una mostra més pura i obtingué un valor de $5,9 \text{ g/cm}^3$ (Román, 2008).

Propietat	Mendelèiev eka-silici (1871)	Winkler i altres germani (1886-)
Massa atòmica	72	72,6
Densitat (g/cm^3)	5,5	5,47
Volum atòmic	13	13,4
Color	Gris fosc	Gris clar
València	IV	IV
Punt de fusió	Fusible i es volatilitza a altes temperatures	Fon a 960°C i es volatilitza a més temperatura
Reacció amb l'aigua	Descompon l'aigua amb dificultat	No descompon l'aigua
Reacció amb àcids	Poc atacat pels àcids	Només atacat per l'aigua règia
Reacció amb àlcals	No l'ataquen	Només si estan fusos
Propietats òxid	EsO_2 , blanc, refractari, es redueix fàcilment amb C, densitat $4,7 \text{ g/cm}^3$	GeO_2 , blanc, refractari, es redueix fàcilment amb C, densitat $4,7 \text{ g/cm}^3$
Propietats hidròxid	Dèbilment bàsic	Dèbilment bàsic
Propietats clorur	EsCl_4 , líquid, bull a $\sim 90^\circ\text{C}$, densitat $1,9 \text{ g/cm}^3$	GeCl_4 , líquid, bull a 86°C , densitat $1,89 \text{ g/cm}^3$
Propietats hidrur	EsH_4 gas inestable, però més que el SnH_4	GeH_4 gas inestable, però més que el SnH_4
Propietats fluorur	EsF_4 , gas	GeF_4 , gas
Propietats organometal·lic	$\text{Es}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$, bull a 160°C i densitat $0,96 \text{ g/cm}^3$	$\text{Ge}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$, fon a 90°C , bull a $163,5^\circ\text{C}$ i densitat $0,99 \text{ g/cm}^3$

Figura 10. Predicció de Mendelèiev de les propietats de l'Escandi.

Quatre anys després, el químic suec Lars Fredrick Nilson (1840-1899) descobrí un altre nou element, al qual anomenà escandi. Les seves propietats coincidien amb les descrites per Mendeléiev per a l'eka-bor (Nilson, 1879). I el 1886, el químic alemany Clemens Alexander Winkler (1838-1904), mentre realitzava uns anàlisis rutinaris del mineral argirodita, descobert feia poc a Saxònia, en una mina d'argent de Himmelfurst, arribà a la conclusió que s'havia topat amb un nou element químic que era l'eka-silici descrit per Mendeléiev i al qual anomenà germani (Winkler, 1886). A la taula de la Fig. 10 es pot observar l'encert de Mendeléiev en la seva predicció de les propietats de l'escandi.

Mendeléiev seguí publicant articles sobre la seva taula periòdica amb diferents versions, se n'han comptabilitzat fins a 30. Una d'elles, de forma allargada, i publicada el 1879 ja amb el Ga, és la que evolucionà fins a la taula periòdica actual (Fig. 11).

														even elements						
														I	II	III	IV	V	VI	VII
														H						
														Li	Be	B	C	N	O	F
														Na						
even elements														odd elements						
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII							I	II	III	IV	V	VI	VII
—	—	—	—	—	—	—								—	—	—	—	—	—	—
K	Ca	—	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni					Cu	Mg	Al	Si	P	S	Cl
Rb	Sr	Yt	Zr	Nb	Mo	—	Ru	Rh	Pd					Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J
Cs	Ba	La	Ce	—	—	—	—	—	—					—	—	—	—	—	—	—
—	—	Er	Di?	Ta	W	—	Os	Ir	Pt					Au	Hg	Tl	Pb	Bi	—	—
—	—	—	Th	—	U	—	—	—	—					—	—	—	—	—	—	—

Figura 11. Versió de la taula periòdica del 1879, molt semblant a les actuals. (Wikimedia Commons)

Els gasos nobles i els lantànids

El 1894 el físic britànic Lord Rayleigh (1842-1919) i el químic William Ramsay (1852-1916) descobriren l'existència del primer gas noble, l'argó a l'aire. Al següent any, Ramsay aconseguí alliberar heli d'alguns minerals d'urani (cleavelita i uraninita). Com que Ramsay era admirador de l'obra de Mendeléiev pensà que podrien existir altres elements semblants i que formarien un nou grup a la taula periòdica. Les posicions de l'He i de l'Ar indicaven que havien d'existir tres gasos nobles més. El 1898, amb la

col·laboració del químic britànic Morris William Travers (1872-1961), aïllaren el neó, el criptó i el xenó (Román, 2008).

El descobriment dels elements anomenats lantànids s'inicià el 1803 amb el descobriment del ceri, i anà augmentant a finals del segle XIX. Era un conjunt d'elements difícils d'encaixar en la taula periòdica perquè tots tenien propietats molt semblants a l'itri i al lantani. Fou un químic txec, Bohuslav Brauner (1855-1935), admirador i amic de Mendeléiev, qui trobà una ubicació per a tots ells en la sèrie octava i en una caixa al peu (Román, 2008). Aquesta idea, anomenada hipòtesi dels asteroides ja que com els asteroides ocupen el lloc d'un planeta al sistema solar, també hi podia haver elements químics molt semblants que ocupassin tots un mateix lloc a la taula periòdica, fou proposada a Sant Petersburg per Brauner el 1902 en l'11è Congrés Rus de Ciències Naturals (Thyssen i Binnemans, 2011) (Fig. 12).

A. Periodisches System der Elemente (volle Gestalt).

Reihe	Gruppe 0	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV	Gruppe V	Gruppe VI	Gruppe VII	Gruppe VIII
	—	—	—	—	RH ₄	RH ₃	RH ₂	RH	—
	R	R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₃	RO ₂
1		1 H							
2	He 4	Li 7	Be 9	B 11	C 12	N 14	O 16	F 19	
3	20 Ne	23 Na	24 Mg	27 Al	28 Si	31 P	32 S	35.5 Cl	
4	A 40	K 39	Ca 40	Sc 44	Ti 48	V 51	Cr 52	Mn 55	Fe 56 Co 59 Ni 59 Cu 63
5		63 Cu	65 Zn	70 Ga	72 Ge	75 As	79 Se	80 Br	
6	Kr 82	Rb 85	Sr 87	Y 89	Zr 90	Nb 94	Mo 96	—100	Ru 102 Rh 106 Pd 106 Ag 108
7		108 Ag	112 Cd	114 In	119 Sn	120 Sb	128 Te	127 J	
8	Xe 128	Ce 138	Ba 137	La 139	Ce 140 Pr 141 Nd 144 —145	—147 Sm 148 Eu 151 —152	—155 Gd 156 —159 —160		
					Tb 163 Ho 165 Er 166 —167	Tm 171 Yb 173 —176			
					—178	Ta 182 W 184	—190	Os 191 Ir 198 Pt 195 Au 197	
9		197 Au	200 Hg	204 Tl	207 Pb	209 Bi	212 —	214 —	
10	—216	—220	Rd 225?	—230	Th 238	—235	U 238		

Figura 12. Taula periòdica de Brauner del 1902 amb el grup de lantànids al mig, separats de la resta d'elements, i el grup 0 dels gasos nobles a l'esquerra (Wikimedia Commons).

CONCLUSIONS

És de sobra conegut que abans de Mendeléiev hi hagué altres científics que realitzaren intents de classificació dels elements coneguts, que en aquest article no s'han esmentat: Dobereiner (1829), Kremer (1852), Gladston (1853), Cooke (1854), Lenssen (1857), Pettenkofer (1858), Dumas (1858), Strecker (1859), Hinrichs (1867), Odling (1857, 1864), De Chancourtois (1862), Newlands (1865) i, per descomptat, Meyer (1864, 1871) el qual arribà a una ordenació semblant a la de Mendeléiev els mateixos anys que aquest. No obstant això, Mendeléiev fou l'únic que se n'adonà que existia una llei natural,

la llei periòdica, que regia les característiques dels elements químics. Mendeléiev descobrí aquesta llei, l'ordenació en una taula dels elements en base a ella esdevé un tema secundari. I la llei periòdica li permeté predir l'existència de nous elements i les seves característiques, previsió que mai podrien haver fet la resta de científics (Babaev, 2009).

Per una altra part, la llei periòdica ha eclipsat altres grans descobriments que realitzà, els quals no apareixen en els llibres de text ni en les històries de la química: descobrí abans que Andrews la temperatura crítica, que ell anomenà temperatura absoluta d'ebullició; formulà per primera vegada l'equació d'estat dels gasos ideals vàlida per a qualsevol gas en qualsevulla condicions, una equació coneguda per tots els estudiants de química i que, en el món occidental, mai se la relaciona amb Mendeléiev malgrat s'explica que s'obté d'altres lleis que sí tenen autors; a la mateixa equació hi posà una constant, la constant dels gasos R , que ha esdevingut una constant molt important, i fou el primer que en calculà el seu valor que ha variat poc malgrat actualment s'emprin mètodes molt més sofisticats que els emprats per Mendeléiev per a la seva determinació.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Babaev, E.V. (2009). *Dmitriy Mendeleev: A Short CV, and A Story of Life*. [Consulta: 2014]. Recuperat a <http://www.mendcomm.org/Mendeleev.a.spx>
- Giunta, C. (s.d.). *Elements and Atoms. Chapter 12: Mendeleev's First Periodic Table*. [Consulta: 2014]. Recuperat a <http://web.lemoyne.edu/GIUNTA/EA/MENDELEEVann.HTML#foot17>
- Gran Enciclopèdia Catalana. *Mikhail Vasil'jevič Ostrogradskij*. [Consulta: 2014]. Recuperat a <http://www.enciclopedia.cat/>
- Jensen, W. (2003). *The Universal Gas Constant*. J. Chem. Educ. 80.
- Lecoq de Boisbaudran, P.E. (1875). *Caractères chimiques et spectroscopiques d'un nouveau métal, le gallium, découvert dans une blende de la mine de Pierrefitte, vallée d'Argelès (Pyrénées)*. Comptes rendus de l'Académie des sciences, 81.
- Mendeléiev, D.I. (1861). *Ueber die Ausdehnung der Flüssigkeiten beim Erwärmen über ihren Siedepunkt*. Ann. Chem. Pharm., 119.
- Mendeléiev, D.I. (1869). *Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente*. Zeitschrift für Chemie, 12.
- Mendeléiev, D.I. (1870). *Bemerkungen zu den Untersuchungen von Andrews über die Compressibilität der Kohlensäure*. Ann. Physik u. Chem., 217.

- Mendeléiev, D.I. (1872). *Die periodische Gesetzmässigkeit der chemischen Elemente*. Annalen der Chemie und Pharmacie Supplement, 8.
- Mendeleiev, D.I. (1874). *О сжимаемости газов (Sobre la compressibilitat dels gasos)*. Russian Journal of Chemical Society and the Physical Society, 6.
- Mendeleiev, D.I. (1877). *Researches on Mariotte's Law*. Nature, 15.
- Mychko, D.I. (s.d.). Универсальная газовая постоянная Д. И. Менделеева.
- Nilson, L.F. (1879). *Sur le scandium, élément nouveau*. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, 88.
- Pisarzhevski, O.N. (1955). *Dmitri Ivánovich Mendeléiev*. University Press of the Pacific.
- Román, P. (2008). *El profeta del orden químico. Mendeleev*.
- The Great Soviet Encyclopedia (1970-79). *Aleksei Savich*. [Consulta: 2014]. Recuperat a <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Aleksei+Savich>
- Thyssen, P. i Binnemans, K. (2011). *Accommodation of the Rare Earths in the Periodic Table: A Historical Analysis*. ELSEVIER.
- Viquipèdia. [Consulta: 2014]. Recuperat a <http://ca.wikipedia.org>
- Wikipedia. [Consulta: 2014]. Recuperat a <http://en.wikipedia.org>
- Winkler, C.A. (1886). *Germanium, Ge, a New Nonmetallic Element*. Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft, 19.